

浸润面位置的确定方法对涉水 边坡稳定性分析的影响

唐晓松¹, 郑颖人¹, 林成功²

(1. 后勤工程学院 军事建筑工程系, 重庆 400041; 2. 重庆大学 土木工程学院, 重庆 400030)

摘要: 水库蓄水后将形成大量的涉水边坡, 库水水位的变化将对其稳定性产生影响, 目前关于这类边坡的稳定性分析, 一般都是首先确定坡体内浸润面的位置, 然后再进行稳定性分析。因此确定浸润面位置的方法正确与否, 对稳定性分析的结果是否准确至关重要。由于实际工程中通常采用经验概化的方法来粗略地确定岸坡坡体内稳态浸润面的位置, 因此该方法计算结果的可靠性究竟如何已经成为一个急需解决的问题。通过对比分析渗流计算和经验概化这两种浸润面位置的计算方法对水边坡稳定性分析结果的影响, 从而确定按经验概化的方法计算到底存在有多大误差。从算例所得到的结果看, 按经验概化法所确定的稳态浸润面位置进行稳定性分析, 其结果将偏于危险, 且误差在 10% 以上, 应予以重视。

关键词: 边坡工程; 涉水边坡; 浸润面; 经验概化; 渗流计算; 稳定性

中图分类号: P 642.22

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 6915(2008)增 1 - 2814 - 06

INFLUENCE OF APPROACH ON LOCATING PHREATIC SURFACE HYDROUS SLOPE STABILITY ANALYSIS

TANG Xiaosong¹, ZHENG Yingren¹, LIN Chenggong²

(1. Department of Architecture and Civil Engineering, Logistical Engineering University, Chongqing 400041, China;

2. College of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400030, China)

Abstract: After impoundment of reservoir, there would be a large amount of hydrous slopes, with stability being influenced of the change of the water level. As a common practice, the present slope stability analysis would begin with the determination of phreatic surface, and then the stability would be analyzed. Therefore whether the approach to locate the phreatic surface is appropriate or not is essential to the accuracy of the stability analysis. However the method of roughly generalizing the phreatic surface of the bank slope through experience is commonly adopted, so the correct calculation method is an urgent problem. In this paper, the phreatic surface is calculated through seepage calculation and generalized through experience respectively. Then the effects of these two methods on the stability analysis are compared and analyzed to determine the inaccuracy of the method through experience. From the calculation example, the inaccuracy rate through experience is above 10%.

Key words: slope engineering; hydrous slope; phreatic surface; experience generalization; seepage calculation; stability

收稿日期: 2006 - 12 - 04; **修回日期:** 2007 - 01 - 04

作者简介: 唐晓松(1979 -), 男, 2001 年毕业于解放军后勤工程学院岩土工程专业, 现为博士研究生, 主要从事岩土工程稳定性分析及其数值模拟方面的研究工作。E-mail: hnm97@163.com

1 引言

水库库水位的变化将对涉水边坡的稳定性产生影响, 甚至有可能诱发滑坡, 因此库区涉水边坡的稳定性分析已经成为一个重要的研究内容。目前国内关于涉水边坡的稳定性分析作了大量的研究工作。刘新喜^[1]通过对水位下降过程中边坡稳定性的研究表明, 水位下降产生的渗流对边坡稳定性的影响非常大, 其影响的程度取决于坡体渗透系数的大小, 渗透系数越小, 边坡稳定性越差。

D. V. Griffiths 和 P. A. Lane^[2]研究了浸润面与库水位作用下的边坡稳定性。采用自编程序, 应用有限元强度折减法, 通过算例计算得到的边坡安全系数与传统方法计算得到的安全系数较好的吻合, 但未显示滑裂面, 也不能反映库水位下降速率对边坡稳定性的影响。

C. S. Desai^[3]将有限元应用到坡体承受库水瞬态下降的稳定分析中, 用有限元确定坡体中不同时刻浸润面的位置, 然后用瑞典圆弧法分析了密西西比河河岸的稳定性。

从上述前人所作的工作可以看出, 关于涉水边坡的稳定性分析一般都是首先确定坡体内浸润面的位置, 然后再进行稳定性分析, 因此浸润面位置的确定方法将直接影响稳定性分析的结果。目前工程中广泛采用的方法大都根据经验概化粗略地确定坡体内稳态浸润面的位置, 本文将通过与按渗流数值计算确定的瞬态浸润面位置分析得到的结果进行对比, 来确定按经验概化得到的稳态浸润面位置进行涉水边坡稳定性分析的方法到底有多大误差。由于 PLAXIS 程序^[4]和 SEEP/W 程序在渗流计算方面具有比较强大的功能, 因此文中将采用这两个程序进行涉水边坡的稳定性分析。

2 两种程序的渗流计算理论介绍

2.1 SEEP/W 渗流计算

SEEP/W 既可以进行稳态分析, 也可以进行瞬态分析, 其中稳态分析适合于与时间变量无关的分析; 当边界条件发生变化, 并且需要对每一时刻坡体内浸润面的位置进行研究时, 则需要进行瞬态分析。

SEEP/W 程序认为孔隙水在饱和土和非饱和土中的流动均符合达西定律(Richards, 1931 和 Childs & Collins-George, 1950), 其不同之处在于非饱和土的渗透系数不是一个常量, 而是一个随含水量和孔隙水压力的变化而变化的变量。达西定律控制微分方程的表达式为

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial H}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y \frac{\partial H}{\partial y} \right) + Q = \frac{\partial \Theta}{\partial t} \quad (1)$$

式中: H 为总水头值, k_x 为 x 方向的渗透系数, k_y 为 y 方向的渗透系数, Q 为边界流量, Θ 为体积含水量, t 为时间参数。

式(1)表明土体内含水量的变化等于流入、流出土体的水量和边界补给水量之和。

对于稳态分析 SEEP/W 程序认为流入、流出土体的水量和边界补给水量在任何时刻都是平衡的, 既认为土体内含水量在任何时刻都不发生变化, 因此式(1)变为

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial H}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y \frac{\partial H}{\partial y} \right) + Q = 0 \quad (2)$$

对于瞬态分析 SEEP/W 程序认为此时土体内含水量的变化取决于土体的应力状态和土体的性状。程序认为对于饱和土和非饱和土而言, 其应力状态都可由两个状态变量 ($-u_a$) 和 ($u_a - u_w$) 所描述 (Fredlund and Morgenstern, 1976 和 Fredlund and Morgenstern, 1977), 其中 u_a 表示孔隙气压力, u_w 表示孔隙水压力。

SEEP/W 程序首先假设总应力为常量, 因此土体不发生加在载或者卸荷; 然后假设孔隙气压力在大气压的条件下始终保持不变, 这就意味着 ($\sigma - u_a$) 不会随着土体内含水量的变化而变化, 是一个常量。因此土体内含水量的变化只取决于状态变量 ($u_a - u_w$), 由于 u_a 也是一个常量, 所以土体内含水量的变化只是孔隙水压力 u_w 的函数。

土体内含水量关于孔隙水压力的函数表达式, 如下:

$$\partial \Theta = m_w \partial u_w \quad (3)$$

式中: m_w 为土体含水量曲线上一点的斜率, 如图 1 所示。

总水头的定义式为

$$H = \frac{u_w}{\gamma_w} + y \quad (4)$$

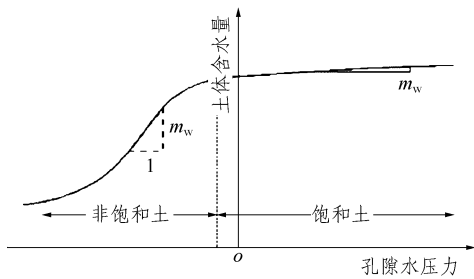


图 1 m_w 和孔隙水压力的关系示意图

Fig.1 Relationship between m_w and pore water pressure

式(4)又可以写为

$$u_w = (H - y)\gamma_w \quad (5)$$

式(5)代入式(3)中得

$$\partial\Theta = m_w\gamma_w\partial(H - y) \quad (6)$$

式(6)代入式(1)中得

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(k_x \frac{\partial H}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(k_y \frac{\partial H}{\partial y}\right) + Q = m_w\gamma_w \frac{\partial(H - y)}{\partial t} \quad (7)$$

由于标高 y 是一个常量, 所以式(7)可以简化为

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(k_x \frac{\partial H}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(k_y \frac{\partial H}{\partial y}\right) + Q = m_w\gamma_w \frac{\partial H}{\partial t} \quad (8)$$

式(8)即为 SEEP/W 进行瞬态分析程序的编制依据。

由于本文主要研究的是概化浸润面位置的分析方法对涉水边坡稳定性分析的影响, 因此分析时均按饱和土条件考虑, 即在程序中设置渗透系数是一个不随含水量和孔隙水压力变化而变化的常量, 同时设置土体内的含水量不随孔隙水压力的变化而变化, 则如图 1 所示式(8)中的系数 $m_w = 0$ 。

2.2 PLAXIS 渗流计算

PLAXIS 程序认为水流在多孔介质中的流动也符合达西定律, 其控制微分方程的表达式如式(2)所示。

PLAXIS 程序的不同之处在于其为了区别孔隙水在饱和土体(浸润面以下)和非饱和土体(浸润面以上)中的流动, 在控制微分方程中引入了一个折减函数 K^r , 则式(2)变成如下形式:

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(K^r k_x \frac{\partial H}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(K^r k_y \frac{\partial H}{\partial y}\right) + Q = 0 \quad (9)$$

折减函数 K^r 的定义如下:

对于孔隙水压力为拉应力: $K^r = \alpha$ 。

对于孔隙水压力为压应力: $K^r = 1$ 。

对于过渡区域: $K^r = \alpha + (1 - \alpha)\frac{\gamma_w\delta - p}{\gamma_w\beta}$ 。

上述 K^r 和孔隙水压力之间的关系可以表示为图 2。

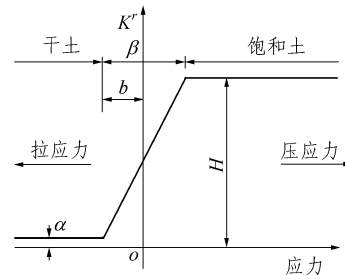


图 2 K^r 和孔隙水压力之间的关系示意图

Fig.2 Relationship between K^r and pore water pressure

如上所述折减函数 K^r 在浸润面以下等于 1; 在浸润面以上等于 α ; 在浸润面附近的过渡区域 K^r 从 1 变化到 α , 如图 2 所示系数 β 和 δ 定义了过渡区域的大小和位置。

3 库水水位下降速率的实现

为了考虑库水水位下降过程中, 由于坡体内水位下降的滞后效应所引起的超孔隙水压力对边坡稳定性的影响, 就必须考虑水位下降速率的影响。本文在两种程序中, 分别采取不同的方法考虑了水位下降速率的影响。

在 SEEP/W 程序中是通过定义边界函数的形式, 定义边界水头 H 和时间的函数, 这样就能考虑库水水位下降速率的因素; 在 PLAXIS 程序中是采用设置固结天数的方法实现的。即如果水位从 30 m 处按 1 m/d 的速率下降, 则程序设置水位从 30 m 下降到 29 m 后稳定 1 d 再下降, 在这一天的时间里程序进行固结计算, 从而使产生的超孔隙水压力消散 1 d; 同样, 如果水位下降的速率为 2 m/d, 则水位从 30 m 下降到 28 m 后稳定 2 d 再下降, 在这二天的时间里也进行固结计算, 从而使产生的超孔隙水压力消散 2 d。从上述的内容可以看出, 在 PLAXIS 程序中如果单纯地考虑水位的变化是无法考虑时间因素的, 所以采用结合固结计算的方法来考虑时间因素, 即把水位下降到一定高度所经历的时间通过固结计算的时间来体现。因此对于不同的水位下降速率, 也就是水位下降到一定高度所经历的不同时间, 就可以通过设置水位下降到一定高度后, 再进

行不同时间的固结计算来实现。

4 坡体上库水压力的影响

两个分析软件在考虑坡体上库水压力的影响方面, 采用了不同的方法。其中, PLAXIS 程序是根据边界节点的水头值自动生成坡体上的外水压力, 如图 3 所示; 而 GEO-SLOPE(SLOPE 和 SEEP/W 耦合)程序进行分析时, 则是把库水定义成无应力材料, 如图 4 所示。

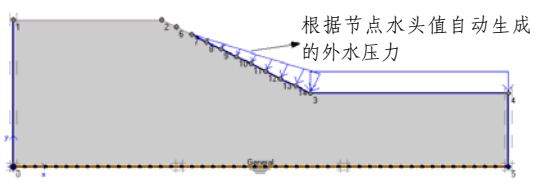


图 3 PLAXIS 程序中外水压力示意图

Fig.3 Outside water pressure in the program of PLAXIS

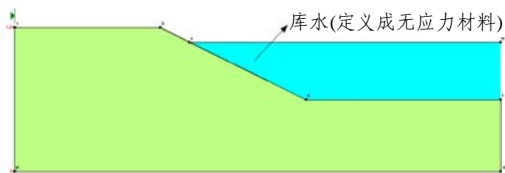


图 4 GEO-SLOPE 程序中外水压力示意图

Fig.4 Outside water pressure in the program of GEO-SLOPE

5 坡体稳定性的分析方法

在确定了坡体内浸润面的位置后, 还需进行稳定性分析, 即安全系数的求解。在 GEO-SLOPE 程序中, 本文是采用 SEEP/W 和 SLOPE/W 进行耦合的方法, 利用传统条分法进行安全系数和滑面位置的求解。

PLAXIS 程序则是通过程序提供的有限元强度折减法来进行安全系数的求解^[5~10]。该方法不需要对滑动面形状和位置做假定, 也无需进行条分, 通过强度折减使边坡达到不稳定状态, 非线性有限元静力计算将不收敛, 此时的折减系数就是安全系数。

在程序中, 系数 $\sum M_{sf}$ 定义为强度的折减系数, 其表达式为

$$\sum M_{sf} = \frac{\tan \varphi_{\text{input}}}{\tan \varphi_{\text{reduced}}} = \frac{c_{\text{input}}}{c_{\text{reduced}}} \quad (10)$$

式中: $\tan \varphi_{\text{input}}$, c_{input} 为程序在定义材料属性时输入

的强度参数值; φ_{reduced} , c_{reduced} 为在分析过程中用到的经过折减后的强度参数值。程序在开始计算时默认 $\sum M_{sf} = 1.0$, 然后 $\sum M_{sf}$ 按设置的数值递增至计算模型发生破坏, 此时的 $\sum M_{sf}$ 值即为计算模型的安全系数值。

6 计算结果

算例: 均质边坡, 坡高 $H = 30 \text{ m}$, 黏聚力 $c = 25 \text{ kPa}$, 坡角 $\arctan(1/2)$, 土容重 $\gamma_{\text{dry}} = 20 \text{ kN/m}^3$; $\gamma_{\text{wet}} = 22 \text{ kN/m}^3$, 内摩擦角 $\varphi = 23^\circ$, 泊松比 $\nu = 0.35$, 弹性模量 $E = 2000 \text{ kPa}$, 渗透系数 $k_x = k_y = 1 \text{ m/d}$, 坡体前部库水水位下降速率 3 m/d 。利用 GEO-SLOPE(SLOPE/W 和 SEEP/W 耦合)程序和 PLAXIS 程序的分析结果见表 1。

图 5 所示为根据经验概化得到坡体内浸润面位置的示意图。从图中可以看出, 目前实际工程中在进行涉水边坡的稳定性分析时, 一般是根据水位下降到最低时的水位高度, 按经验概化的稳态浸润面位置进行稳定性分析, 文中称此时得到的安全系数的数值为“工程采用值”。

按上述“工程采用值”的取值条件, 从表 1 可以看出两个程序的计算结果分别是 1.227 和 1.241, 两者之间的误差为 1.14%, 为了进行比较这里取偏低的数值 1.227 为“工程采用值”。

从表 1 中的计算结果可以看出, 不同的程序和不同的分析方法得到的安全系数的计算结果并不是在水位下降到最低时到达最低值, 而是在库水水位下降到 38 m 时, 边坡的安全系数最低, 称此时的水位为“最不利水位”^[9], 因此按水位下降到低时的安全系数取值, 将使实际工程偏于危险。

在“最不利水位”, 当不考虑超孔隙水压力的影响时, 按经验概化得到的稳态浸润面位置进行稳定性分析, 在这种情况下两种分析软件的计算结果分别是 1.199 和 1.227, 两者之间的误差为 2.23%; 按渗流数值计算得到的瞬态浸润面位置进行稳定性分析, 两种软件的计算结果分别是 1.109 和 1.079, 两者之间的误差为 2.71%。而按经验概化得到的稳态浸润面位置进行稳定性分析的计算结果比按渗流计算得到的瞬态浸润面位置进行稳定性分析的计算结果大 10% 左右, 因此按经验概化得到的稳态浸润面位置进行稳定性分析的计算结果进行设计将偏于危险。

当在计算中考虑超孔隙水压力和水位下降速率

表 1 安全系数计算结果表
Table 1 Calculation results of safety factors

水位/m	不考虑超孔隙水压力(与库水下降速率无关)				考虑超孔隙水压力(与库水下降速率有关)	
	GEO-SLOPE (经验概化)	GEO-SLOPE (渗流计算)	PLAXIS (经验概化)	PLAXIS (渗流计算)	PLAXIS (渗流计算)	GEO-SLOPE (渗流计算)
65	1.692	1.692	1.738	1.738	1.738	1.692
62	1.559	1.556	1.644	1.628	1.497	1.532
59	1.471	1.458	1.543	1.500	1.424	1.424
56	1.386	1.359	1.468	1.398	1.329	1.314
53	1.315	1.271	1.385	1.294	1.248	1.234
50	1.260	1.188	1.325	1.221	1.189	1.152
47	1.221	1.141	1.275	1.162	1.112	1.107
44	1.195	1.151	1.247	1.117	1.101	1.049
41	1.187	1.132	1.234	1.093	1.083	1.038
38	1.199	1.109	1.227	1.079	1.047	0.995
35	1.227	1.124	1.241	1.082	1.074	1.028

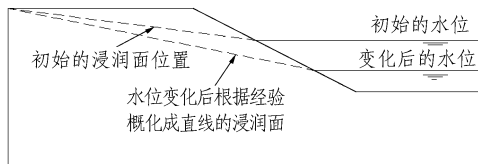


图 5 根据经验概化得到坡体内浸润面位置的示意图

Fig.5 Phreatic surface of the slope through experience

的影响时，两种分析软件的计算结果分别为 1.047 和 0.995，两者之间的误差为 5%，误差略为偏大的主要原因可能是前面所述的两个分析软件在渗流分析计算方面的区别造成的，在 PLAXIS 程序引入了折减函数 K' ，即在浸润面附近考虑了过渡区域的影响，因此在库水水位下降过程中按 SEEP/W 计算得到的坡体内浸润面位置要略高于 PLAXIS 程序计算得到的坡体内浸润面位置，所以利用 GEO-SLOPE 程序分析得到的安全系数的计算结果要略低于利用 PLAXIS 程序分析得到的安全系数的计算结果。

在“最不利水位”，考虑了超孔隙水压力和水位下降速率的影响时安全系数的计算结果 1.047 和 0.995 与“工程采用值” 1.227 之间的误差分别是 14.67%和 18.91%，因此按“工程采用值”进行设计明显偏于危险。图 6 绘制了“工程采用值” 1.227 所对应的滑面和浸润面位置示意图；图 7 和 8 分别绘制了安全系数为 1.047 和 0.995 时所对应的滑面和浸润面位置示意图。

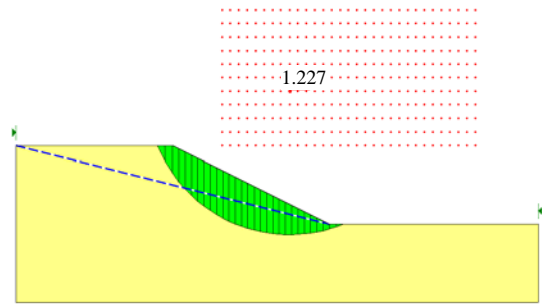


图 6 GEO-SLOPE 程序按经验概化得到的浸润面位置计算得到的滑面和浸润面位置示意图($F_s = 1.227$ ，不考虑超孔隙水压力)

Fig.6 Slide surface and location of the phreatic surface through experience in the program of GEO-SLOPE ($F_s = 1.227$, not considering of the excess pore water pressure)

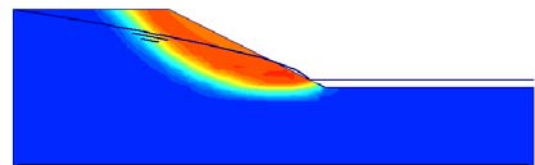


图 7 PLAXIS 程序按渗流计算得到的浸润面位置计算得到的滑面和浸润面位置示意图($F_s = 1.047$ ，考虑超孔隙水压力)

Fig.7 Slide surface and location of the phreatic surface through experience in the program of PLAXIS ($F_s = 1.047$, considering the excess pore water pressure)

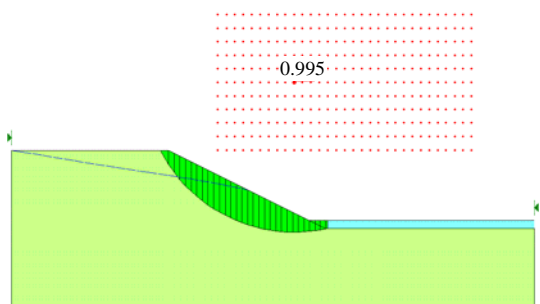


图 8 GEO-SLOPE 程序按渗流计算得到的浸润面位置计算得到的滑面和浸润面位置示意图($F_s = 0.995$, 考虑超孔隙水压力)

Fig.8 Slide surface and location of the phreatic surface through experience in the program of GEO-SLOPE ($F_s = 0.995$, considering the excess pore water pressure)

从上述的计算结果可以看出, 按渗流数值计算得到的瞬态浸润面位置进行涉水边坡的稳定性分析, 比目前工程中广泛采用的根据经验概化得到的稳态浸润面位置来进行稳定性分析的方法更合理, 而在计算过程中, 应充分考虑坡体内超孔隙水压力的积累与消散以及水位下降速率对涉水边坡稳定性的影响。

7 结 论

本文利用 PLAXIS 程序和 GEO-SLOPE(SLOPE 和 SEEP/W 耦合)程序结合算例, 就浸润面位置的确定方法对涉水边坡的稳定性分析的影响进行了研究。通过计算可以看出, 浸润面位置确定方法的不同将直接影响到边坡稳定性的分析结果, 按目前实际工程中广泛采用的根据经验概化得到的稳态浸润面位置进行分析所得到的结果偏于危险, 而按渗流数值计算得到的瞬态浸润面位置进行稳定性分析更合理, 并且为了更贴近工程实际, 在分析中要充分考虑坡体内超孔隙水压力的积累与消散和水位下降速率对稳定性分析的影响。尤其应注意的是, 如果采用目前广泛应用的按经验概化的方法来计算如三峡库区等涉水边坡的稳定性, 将存在潜在危险, 甚至可能带来地质灾害。

参考文献(References):

[1] 刘新喜. 库水位下降对滑坡稳定性的影响及工程应用研究[博士学位论文][D]. 武汉: 中国地质大学, 2003.(LIU Xinxi, Effects of drawdown of reservoir water level on landslide stability[Ph. D. Thesis][D].

Wuhan: China University of Geosciences, 2003.(in Chinese))

- [2] GRIFFITHS D V, LANE P A. Slope stability analysis by finite elements[J]. Geotechnique, 1999, 49(3): 387 - 403.
- [3] DESAI C S. Drawdown analysis of slopes by numerical method[J]. Journal of the Geotechnical Engineering, 1977, 103(GT7): 667 - 676.
- [4] 唐晓松, 郑颖人. 应用 PLAXIS 有限元程序进行渗流作用下的边坡稳定性分析[J]. 长江科学院院报, 2006, 23(4): 13 - 16.(TANG Xiaosong, ZHENG Yingren. Stability analysis of soil slope under seepage by PLAXIS finite element program[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2006, 23(4): 13 - 16.(in Chinese))
- [5] 赵尚毅, 郑颖人, 时卫民, 等. 用有限元强度折减法求边坡稳定安全系数[J]. 岩土工程学报, 2002, 24(3): 343 - 346.(ZHAO Shangyi, ZHENG Yingren, SHI Weimin, et al. Analysis of safety factors of slope by strength reduction FEM[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2002, 24(3): 343 - 346.(in Chinese))
- [6] 赵尚毅, 郑颖人, 邓卫东. 用有限元强度折减法进行岩质滑坡稳定性分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(2): 254 - 260.(ZHAO Shangyi, ZHENG Yingren, DENG Weidong. Stability analysis of rock slope by strength reduction FEM[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(2): 254 - 260.(in Chinese))
- [7] 郑颖人, 赵尚毅, 张鲁玉, 等. 有限元强度折减法在岩坡和土坡中的应用[C]// 中国岩石力学与工程学会编. 中国岩石力学与工程学会第七次学术大会论文集. 北京: 中国科学技术出版社, 2002: 39 - 41.(ZHENG Yingren, ZHAO Shangyi, ZHANG Luyu. The adopting of FEM compensation in the rock slope and earth slope[C]// Proceedings of the 7th China Society for Rock Mechanics and Engineering. Beijing: China Science and Technology Publishing House, 2002: 39 - 41.(in Chinese))
- [8] 郑颖人, 赵尚毅, 唐晓松, 等. 有限元极限分析法发展及其在岩土工程中的应用[J]. 中国工程科学, 2006, 8(12): 49 - 61.(ZHENG Yingren, ZHAO Shangyi, TANG Xiaosong, et al. Development of finite element limit analysis method and its applications in geotechnical engineering[J]. Engineering Science, 2006, 8(12): 49 - 61.(in Chinese))
- [9] 时卫民, 郑颖人. 库水位下降情况下滑坡的稳定性分析[J]. 水利学报, 2004, (3): 76 - 80.(SHI Weimin, ZHENG Yingren. Analysis of stability of landslide during reservoir drawdown[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2004, (3): 76 - 80.(in Chinese))
- [10] 时卫民. 三峡库区滑坡与边坡稳定性实用分析方法研究[博士学位论文][D]. 重庆: 后勤工程学院, 2004.(SHI Weimin. Research on the practical method to analyzing the landslide and slope stability in the Three-Gorge reservoir area[Ph. D. Thesis][D]. Chongqing: Logistic Engineering University, 2004.(in Chinese))